

画像情報を活用した海浜地形変動の簡易モニタリングシステムの構築と 珠洲市鉢ヶ崎海岸への適用

黒崎弘司¹・由比政年^{2*}・石田 啓²

2010年9月17日受付, Received 17 September 2010
2010年11月17日受理, Accepted 17 November 2010

Development of Coastal Observation System using a Network Camera and its Application to Hachigasaki Beach, Japan

Hiroshi KUROSAKI¹, Masatoshi YUHI^{2*} and Hajime ISHIDA²

Abstract

A local remote sensing system was developed to monitor the morphological processes on sandy beaches. This video monitoring system consists of a small network camera and a host computer installed on the roof of a high-rise building. The data acquisition procedure is fully automated so that photographic images can be recorded continuously for long periods in a cost-efficient way. The angle of the camera is controlled every ten minutes in order to cover a wide area of the beach. The subsequent quantification of morphological changes is carried out on the basis of the bright intensity patterns. Image processing such as averaging (long time exposure) and rectification are then conducted in order to examine the morphological variation such as fluctuations of shoreline and migration of sandbars. The system has been applied to the field observation of Hachigasaki Beach, Ishikawa, Japan. Continuous measurements have been conducted since November 2007 over an alongshore stretch of approximately two kilometers. The comparison between ordinary field survey and image analysis based on the rectified imagery shows reasonable accuracy of the measurement. Temporal and spatial variations of shoreline location and sandbar formation are then examined through the pixel time series collections constructed from the successive time-exposure images. Various morphological features have been captured such as the formation of cusped features of shoreline as well as the splitting of a sand bar. These results show the high capability of the developed system to remotely measure the coastal morphology on sandy beaches.

Key Words: local remote sensing, image processing, network camera, nearshore morphodynamics, hachigasaki beach

キーワード: ローカルリモートセンシング, 画像解析, ネットワークカメラ, 海浜変形, 鉢ヶ崎海岸

¹金沢大学自然科学研究科環境科学専攻博士後期課程 〒920-1192 石川県金沢市角間町 (Division of Environmental Science and Engineering, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192 Japan)

²金沢大学理工研究域環境デザイン学系 〒920-1192 石川県金沢市角間町 (School of Environmental Design, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192 Japan)

*連絡著者 (Correspondence author)

I. はじめに

海岸地帯は近年、漁港、貿易港としての利用だけでなく、工場用地、住宅用地、商業用地あるいは観光地としての利用が進められ、経済活動の中心としてその充実、発展が期待されている。たとえば、国土交通省(旧建設省)はコースタルコミュニティゾーン(CCZ)計画を立案し、石川県白山市の石川海岸や石川県珠洲市の宝立・正院海岸はじめ全国41の地域で海岸地域の有効利用や海辺を中心としたまちづくりを進めている。この他にも、石川県では金沢港を多目的国際ターミナルとして整備するため、港湾機能の強化に加えて工場等の誘致も進められている。さらに、総延長約584kmの海岸線を有する石川県では、千里浜海岸の渚ドライブウェイをはじめとして多くの海岸地域が貴重な観光資源であると同時に、海岸線に沿って高速自動車道路等、都市を結ぶ重要なインフラストラクチャーが位置する。このように海岸地域は非常に重要であり、波浪によって堤防の倒壊や砂浜の消失、港湾の埋没などの被害が発生すると、安全面、経済面、そして観光面で大きな損失を生じさせる。しかしながら、その対策は決して十分とはいえない。

波浪災害の軽減や防止のためには、冬期風浪などの海象特性や漂砂のメカニズム解明が必要である。しかしながら、広い範囲に渡る波浪や海浜流の特性、さらには、漂砂に伴う海浜地形の変動を現地の複雑な条件下で解明することは容易ではなく、今後も継続的なモニタリングが必要とされる。すなわち、沿岸域の波浪や海浜地形変動情報の収集・蓄積を長期的、広域的、そして、高頻度で実施していくこと、および、そのための技術開発を進めていくことが不可欠となる。

海浜地形観測の目的で広く行われてきた深淺測量は、対象が広域の場合、労力、時間、そしてコスト面の制約から、高頻度で実施することは困難である。一方、IT技術の発展により、ローカルリモートセンシングと呼ばれる、安価でメンテナンスフリーの観測システムの構築が可能となりつつある。これに関し、鈴木ら(2008)は、近年、発展・普及の著しいネットワークカメラを活用した安価な沿岸観測システムを構築し、日本各地の沿岸に適用してその有効性を検討するとともに、良好な初期成果を得ている。

こうした新規技術を用いることにより、深淺測量に比べて低コスト・高頻度で、汀線や海底地形の変化等を観測可能となることが期待される。

以上の点を踏まえて、本研究では、鈴木ら(2008)の提案した手法を石川県珠洲市鉢ヶ崎海岸に適用し、ネットワークカメラを利用した低コストの画像観測システムを構築し、その適用性検証を試みる。その概要は以下の通りである。本システムでは、ネットワークカメラ1台を海岸に面した高層ホテル屋上に設置し、撮影方向を自動制御して、年間を通して日出から日没まで汀線付近の画像を取得・保存する。つぎに取得された画像に各種の変換処理を施し、汀線、沿岸砂州の変動解析および入射波・海浜流特性解析への適用性を検討する。

II. 海浜地形変動に対する従来の観測手法

波浪・海浜地形変動に対する観測システムには様々なものが存在する。以下にその代表的なものを示す。

1) 音響測深機による沿岸地形の観測法

1-1) 深淺測量

深淺測量とは、水上において船の位置測量と水深測量を同時に行う測量作業である。現在、海上位置決定にはGPS測量が多く利用される。水深は、水中に音波を発射し、海底で反射して戻ってくるまでの所要時間を測定して得られる。海底地形に対する深淺測量はコスト面の制約から年に数回が限度であり、波浪や潮位の条件に対してどのように地形が変化しているかを捉えるには限界がある。また、測定範囲が測線直下のみであり、測線間が未測定となる線的な計測である。広領域の詳細な地形を把握するためには多くの測線を設けなければならず、そのためには莫大なコストと時間が必要である。

1-2) マルチビーム測量

従来の深淺測量の欠点を克服するための手法の1つとして、マルチビーム測量が提案されている。マルチビーム測量では、指向角の鋭い多数の音響ビームを使用し、海底を帯状に細かく測量することが可能であり、平面的な水深データが得られる。このため広範囲の海底地形の詳細を効率的に捉えることができる。ただし、水深の浅い領域では測定効率が低

下する。

1-3) サイドスキャンソナー

サイドスキャンソナーも近年提案されている新しい観測手法の1つである(浅田, 2005)。これは音波を用いて海底全体を航空写真のように撮影するものである。サイドスキャンソナーでは10kHz~500kHzの周波数の扇形に広がる音波を発信し、海底で散乱し、返ってきた音波を受信する。非常に幅の広い区域を音響画像として捉えることに適している。しかしながら、マルチビーム音響測深機やサイドスキャンソナーは高額であり、広い範囲の継続観測には適していない。現状では、これらの手法は、費用対効果の観点から十分に普及しているとは言い難い。

2) 画像解析による沿岸地形の観測法

2-1) 係留ビデオシステムを用いた観測法

武若ら(1999, 2000)は広角レンズを装着した2台のビデオカメラ(録画継続時間:1時間)を高度150mの位置に自由係留した気球に搭載し、砕波帯の撮影観測を行って、各種水理現象の時空間的構造をビデオ画像から解析する可能性について検討した。その結果、波峰線、砕波の位置、砕波によって発生した気泡、濁質を含む水塊などの移動状況を読み取ることで、砕波帯内外の波の進行状況、表層の流れの状況等を調べるのに必要なデータが取得可能であることを示した。ただし、この手法は荒天時の観測や年間を通じての観測には適していない。

2-2) ARGUSビデオモニタリングシステムによる観測法

ARGUSシステムとは、米国オレゴン州立大学で開発された、ビデオカメラを用いた沿岸管理システムである。近年注目を集めているリモートセンシングの手法の1つであり、高層ビルの屋上等に固定された、複数台のビデオカメラを用いてモニタリングを行い、砕波によって発生する気泡の量と画像の輝度の関係等を用いて海底地形等を推定する手法である。

(Lippman and Holman, 1989)。我が国では、鈴木ら(2002)が、5台のCCDカメラを用いたARGUSビデオモニタリングシステムにより、広域の海岸映像を長期にわたって撮影し、バーやトラフの波浪に対する応答や水深の算定について検討を行っている。現在、この観測システムは、米国、欧州、オーストラリアを始めとして世界各国で広く活用が進められて

いる。

2-3) ネットワークカメラを用いた観測法

鈴木ら(2008)は1台のネットワークカメラによって複数の箇所を(任意の角度・ズーム倍率で)定期的に観測する、海岸連続観測システムを開発した。河口フロントに設置されたネットワークカメラに定時刻にアクセスしてカメラを制御し、映像を遠隔で取得した後に、平均画像作成等の画像処理を実施し、連続的な河口フロントの位置や動きを調査した。その結果、この手法においても、高波浪下の砂浜海岸の変化を捉えられることを示し、ビデオ観測の可能性の高さを示した。

2-4) デジタルビデオカメラを用いた観測法

ARGUSビデオモニタリングシステムは初期費用が高額であり、常に画像を撮影し続けるためデータ量が莫大になるという問題がある。そこで、木村ら(2006, 2007, 2008)は、汎用のデジタルビデオカメラを撮影地点(鳥取海岸)に毎日持ち込む形で1日1回の海岸観測を継続的に行った。その結果、カスプの存在と離岸流の間隔との関係、沿岸砂州の周期的変化、あるいは、波のエネルギーとバーの振幅との関係等、いくつかの興味深い現象を汎用ビデオカメラによる画像撮影により解析可能であることを示した。

以上、主な観測手法を紹介したが、従来の深淺測量に基づく手法は精度が高い半面、低価格ではなく測定頻度が低下するという問題がある。今後、広範囲の領域を継続的に観測していくためには、精度は若干低下するものの、コスト面で有利で、かつ、高頻度の観測が可能な、画像解析に基づく観測手法(図1)を発展させていくことも、今後の海浜地形観測の技術開発において重要と考えられる。本研究では、低コストで、広範囲を連続観測可能な鈴木ら(2008)の手法を採用することとした。

III. 観測対象地域の概要

観測対象地域は、能登半島先端に位置する珠洲市鉢ヶ崎海岸である(図2)。珠洲市は三方向を海に囲まれ、外浦と内浦が存在する。外浦は、冬になると風が強く海が荒れる。一方、鉢ヶ崎海岸が位置する内浦側は、湾になっており、波も比較的穏やかである。鉢ヶ崎海岸は、県内有数の透明度を誇る砂浜海

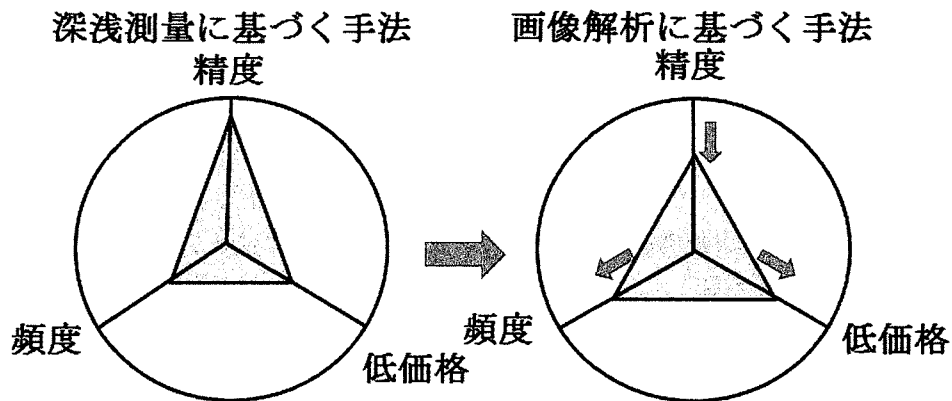


図1 観測手法の比較.

Fig. 1 Comparison of advantages and disadvantages of field observation based on ordinary field survey and image processing method.

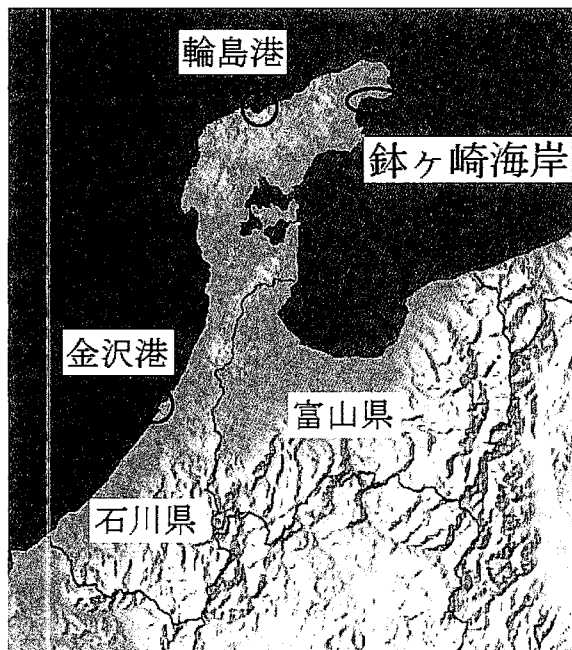


図2 観測対象地域.

Fig. 2 Outline map showing the location of Hachigasaki Beach.

岸として、日本の渚百選にも選定されるなど地元にとって重要な観光資源である。西は蛸島漁港、東は松林に囲まれた約2kmに及ぶ長い海岸線を有しており、珠洲ビーチホテルの東北東2.6kmに小泊漁港、北東3.5kmに紀の川河口が位置する（図3）。この紀の川が鉢ヶ崎海岸の土砂供給源と推測される。紀ノ川河口部は土砂が堆積し、年に数回浚渫が行われている。紀の川流域および鉢ヶ崎海岸背後には最大層厚約300mの珪藻泥岩層が存在する。小泊漁港周辺の泥岩層地帯を除き、蛸島漁港と紀の川河口間の海岸

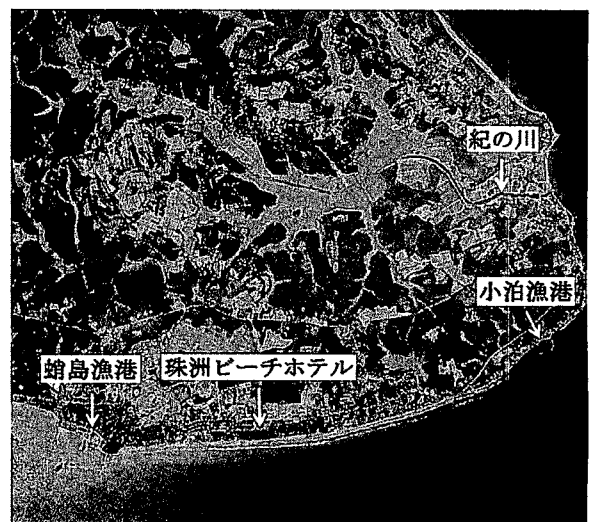
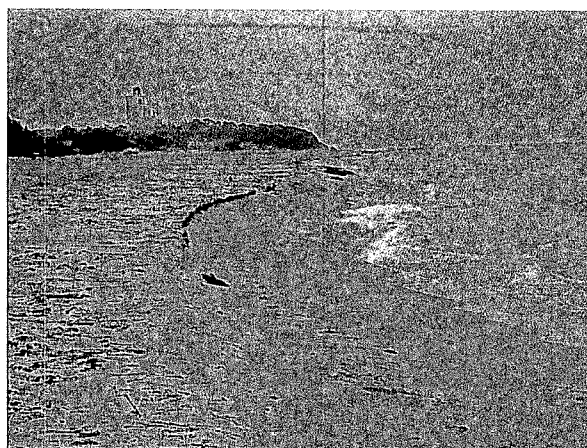


図3 観測対象地域の航空写真
(1991年5月18日、国土地理院に加筆).

Fig. 3 Aerial Photograph of Hachigasaki Beach (taken by Geospatial Information Authority, Japan on 18/May/1991).

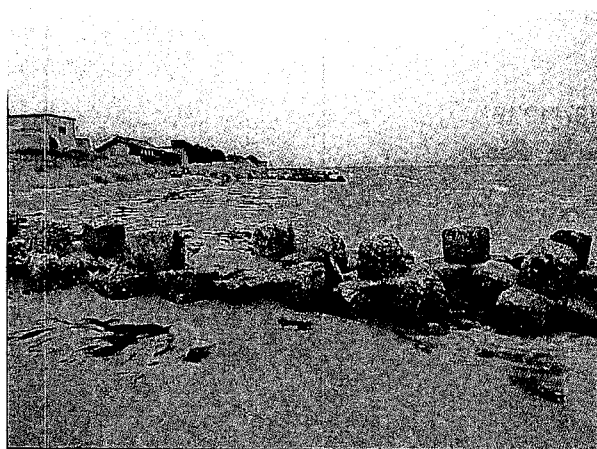
地帯はかつて砂丘地帯であったが、現在では、魚つき保安林が珠洲ビーチホテル前付近から東方向に植林されている。また、蛸島漁港から東にほぼ一直線上に堤防が設置されている。周辺海底地形はなだらかな勾配である。能登半島の影響から波向きはおよそ南東方向であり、沿岸漂砂は西向きで移動していると考えられる。観測地点として、鉢ヶ崎海岸を選定した理由は、海岸付近に高層建築物（珠洲ビーチホテル）があり、機器の設置やメンテナンス、十分な高度（撮影に適した角度）からの撮影が可能となるためである。



(a) 蛸島漁港から珠洲ビーチホテル方面.
(a) from Takoshima Fishing Port to Suzu Beach Hotel.



(b) 珠洲ビーチホテルから蛸島漁港方面.
(b) from Suzu Beach Hotel to Takoshima Fishing Port.



(c) 珠洲ビーチホテルから小泊漁港方面.
(c) from Suzu Beach Hotel to Kodomari Fishing Port.



(d) 紀の川河口.
(d) Kinokawa River mouth.

図4 鉢ヶ崎海岸および紀の川河口 (2009年7月16日撮影).

Fig. 4 Snapshots of Hachigasaki Beach and Kinokawa River mouth (taken on 16/July/2009).

鉢ヶ崎海岸および紀の川河口周辺の写真を以下に示す。図4(a)は蛸島漁港から珠洲ビーチホテル方向を撮影したものであり、汀線付近にカスプ（波状汀線）の発達や浜涯の存在が確認される。図4(b)は逆方向に撮影を行ったものである。図4(c)に示すように珠洲ビーチホテルと小泊漁港間には過去（高度成長期と推測される）に設置された突堤群が確認され、以前は海岸侵食が懸念されていたことが推測される。図4(d)より紀の川河口左岸側に大量の土砂の堆積が確認できる。航空写真で確認した所、堤防からの浜幅は鉢ヶ崎海岸最西端で約60m、珠洲ビーチホテル前で約45m、突堤群最狭部で約6mである。こうした浜幅の変化は、西向きの沿岸漂砂が蛸島漁港により遮断され、漁港東側で堆積が進行しているためと判

断される。また、紀の川河口の浜幅は右岸側で約28m、同左岸側で約65mである（2006年6月）。両岸による差異は、浚渫土砂の処理に加え、紀の川河口の導流堤により南向きの沿岸漂砂が遮断されることも一因と考えられる。

図5は珠洲ビーチホテル前の汀線付近における海浜砂の粒径加積曲線の測定例であり、中央粒径は0.23mmの細砂であり、ふるい分け均等係数（たとえば山口，1980）は1.37である。沿岸方向汀線近くの海浜砂の粒度分布を検討した結果、粒径は沿岸方向でほぼ一様であるが、紀の川河口右岸付近で著しく大きく、中央粒径0.60mm程度となることが確認された。

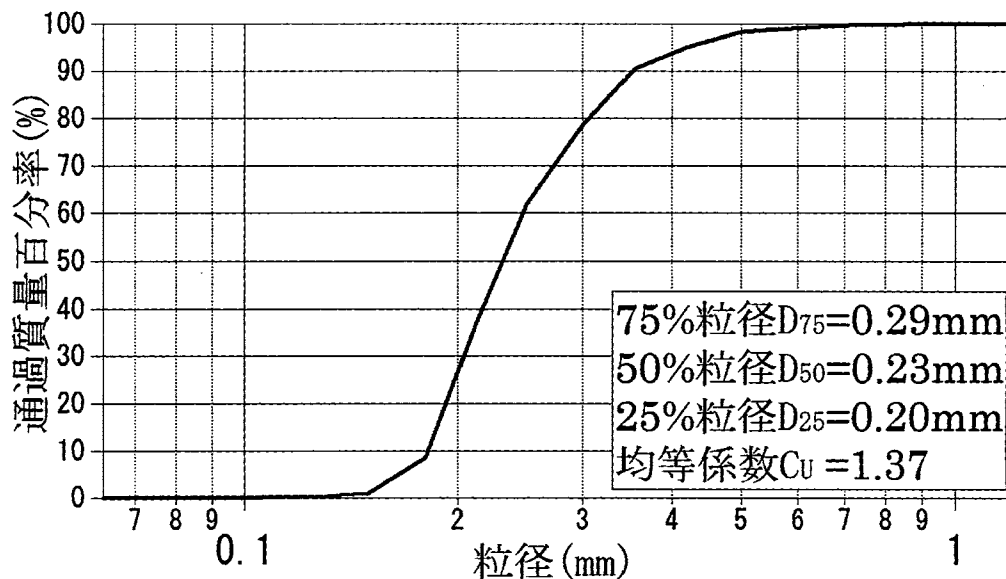


図5 汀線近くの海浜砂の粒径加積曲線
(採取日2007年9月29日, 北緯37°26'19", 東経137°19'16").

Fig. 5 Grain size distribution of sand on Haghighasaki Beach
(collected on 29/Sep./2007 at Latitude 37°26'19" N, Longitude 137°19'16"E).

IV. ネットワークカメラを活用した海浜地形変動観測システムの概要

1) 観測システムの概要

珠洲市鉢ヶ崎海岸を見下ろす高層ホテル(珠洲ビーチホテル)屋上にネットワークカメラ(Canon製VB-C50iR, 136×130×110mm)1台を設置し、蛸島漁港から東側約2kmの範囲の汀線付近を連続撮影し、海面の様子や海浜地形変動に対する長期自動観測を実施した。ネットワークカメラは、汀線付近より高度約36mの地点に位置しており、画像観測に適している。ネットワークカメラは、屋上ドームハウジング(Canon製A-ODW5C5/3)に収容し、ポールに取り付けて設置した。ポールはコンクリート土台で支持され、床面マット上にワイヤーで固定されている。合わせて、ノート型パーソナルコンピュータ(DELL Vostro1000)およびネットワーク利用に必要な周辺機器(モデム、ルーター)と無停電装置を屋上機械室内に設置した。観測システムの概要を図6に示した。現地PCは、研究室PCから、リモートデスクトップ機能を利用して操作可能になっており、適宜設定の変更などを実行できる。また現地PCでは撮影の行われない夜間に平均画像・分散画像の作成を行っている。撮影された画像は現地に設置している

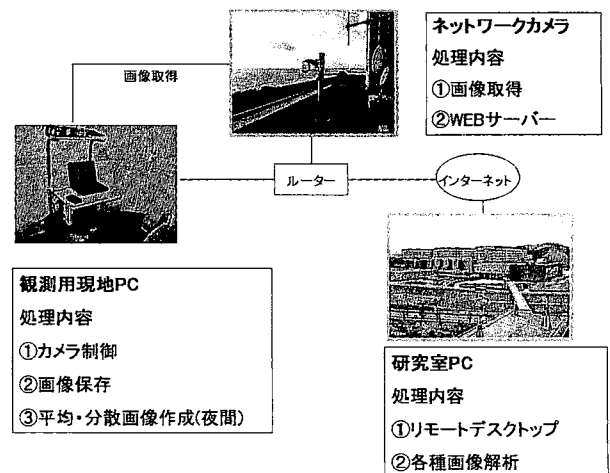


図6 観測システムの概要.

Fig. 6 Configuration of video monitoring and image processing system.

PCの外付けハードディスクに保存される。1日あたりのデータ量は約1.3~2.2GBである。当初はインターネット回線を通して金沢大学内の研究室にデータを転送する予定であったが、ADSL回線の速度が十分でなかったため、定期的(3か月~半年に一度)現地を訪問し、ハードディスクを交換・回収している。なお、平均画像のみならインターネット経由で容易に転送が可能である。この外付けハードディスクの交換を除けば本システムはメンテナンスフリー

である。観測は、2007年11月より現在まで継続して実施されている。

きる。

V. 解析の手法

2) カメラ制御および画像取得法

1台のカメラで広い範囲の観測を実施できるようにするため、カメラは10分間ごとに撮影角度を変更し、1時間で6方向の画像を取得することとした。撮影域の概要を図7に示す。カメラ角度の変更前後に、1分ずつの余裕時間を持たせるため、実質的な画像取得時間は1方向につき8分間であり、毎秒1枚、合計480枚の画像が、各方向で1時間ごとに取得される。撮影は日の出から日没まで行われる。カメラの自動制御はVisual Basicおよび開発用のソフトウェア（Canon WebView Livescope SDK）を用いて行われている。カメラ制御の可能な範囲は、パン（水平角度）が $-170^{\circ} \sim 170^{\circ}$ 、チルト（垂直角度）が $-90^{\circ} \sim 10^{\circ}$ であり、プログラミングにより0.01度単位の制御が可能である。また、光学ズームが最大26倍まで可能である。映像はVGA規格（640×480画素）で保存で

今回は2007年11月23日から2010年5月23日までを解析期間とした。まず、各撮影方向で取得した8分間の平均画像を作成した。次に、その平均画像を座標変換し、輝度値情報を抽出するなどして各種の解析を行った。図7上段はそれぞれの撮影方向のスナップ画像（1秒ごとに撮影される画像）の一例である。画像上ではおよそ汀線方向が東西方向、汀線に直交する方向が南北方向に対応している。

海象・気象条件と海浜地形変動との対応を解明するためには、対象領域周辺における観測期間中の海象・気象データが必要となる。風雨、降雪等に関しては気象庁、有義波高、波向等の波浪等に関しては国土交通省のナウファスシステム（輪島港）、潮位に関しては国土地理院輪島験潮所のデータを用いた。

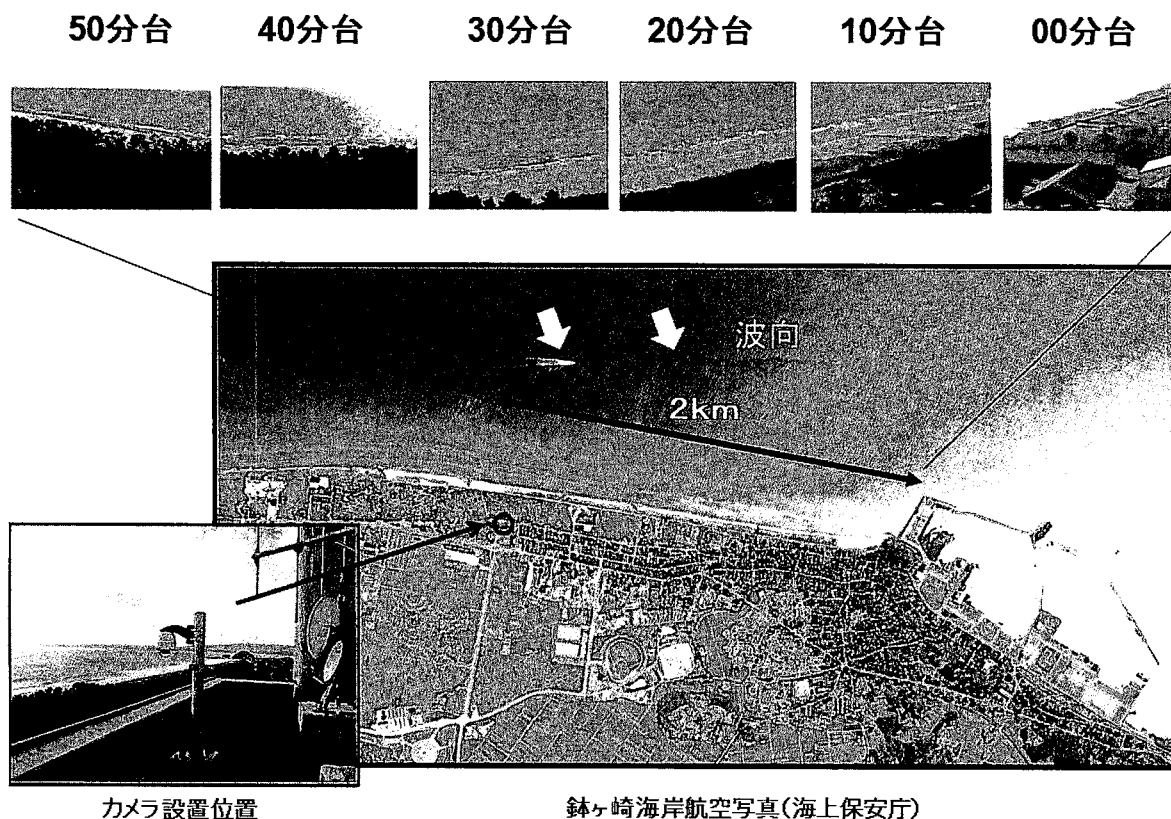


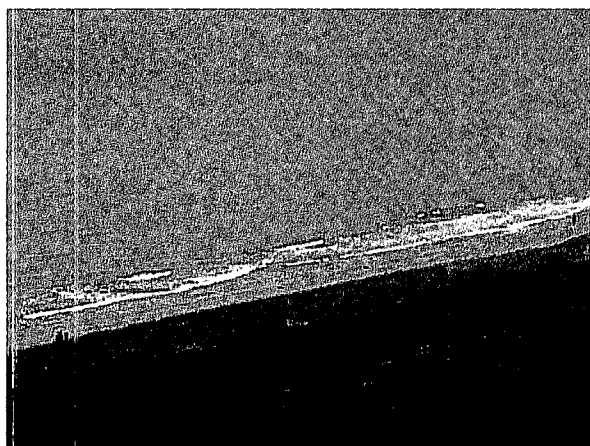
図7 撮影域の概要.

Fig. 7 Overview of monitoring area.

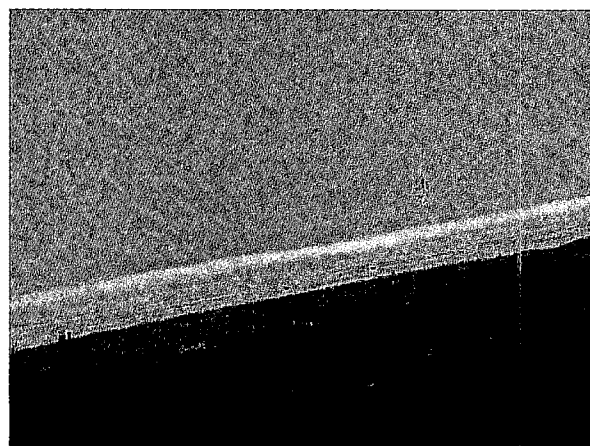
1) 平均画像の作成

毎秒1枚撮影されるスナップ画像(図8(a))を足し合わせ平均化したものを平均画像と呼ぶ。スナップ画像では波の向きや砕波の様子、波が重なって岸に押し寄せる様子などを見て取ることができるが、不規則な波の遡上により変化する汀線の平均位置や海面下の浅瀬、すなわち砂州の位置を推定することは難しい。しかし、多数の画像を時間平均することにより、汀線の平均位置や砂州位置の特定が可能となる。図8は、平均化する時間を変化させて、得られる平均画像の比較を行ったものである。図を見ると平均化する時間を長くするに従い(図8(b)(c))、白い滞筋(砕波の発生しやすい浅瀬の位置)が、より明瞭に現れてくることが分かる。また、図8(d)は4枚の

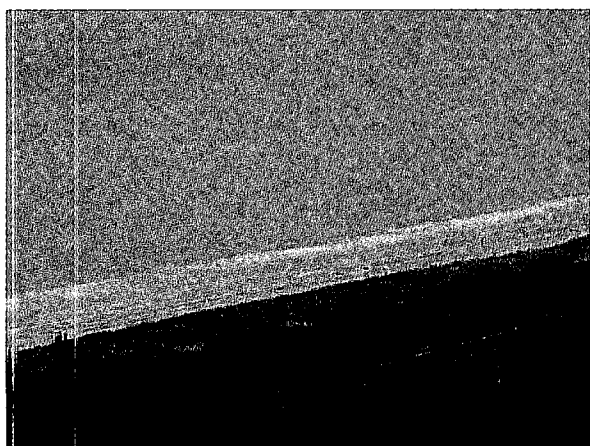
平均画像を重ね合わせたパノラマ画像である。図9はスナップ画像(図8(a))、1分間平均画像(図8(b))、8分間平均画像(図8(c))上のあるライン上(横方向ピクセル番号330)における輝度値変化を比較した一例である。スナップ画像では細かな変化が激しいが、時間平均画像ではそれらが平滑化されている。また、1分間平均画像輝度値と8分間平均画像輝度値を比較すると、前者でもかなり滑らかな輝度分布になっている。現在は、ARGUSシステムの標準観測時間(10分間)を参考に、8分間の平均画像を作成しているが、より短い時間(他の結果を参考にすると4~5分程度)でも地形の変動を把握できると推測される。



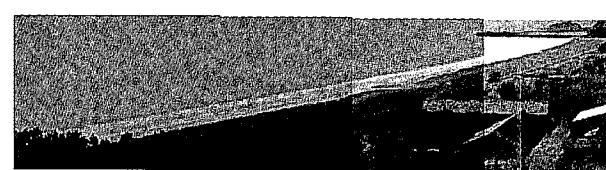
(a) スナップ画像.
(a) snapshot.



(b) 1分間平均画像.
(b) 1 minute time average (time exposure).



(c) 8分間平均画像.
(c) 8 minutes time average (time exposure).



(d) パノラマ画像.
(d) merged image of time exposure.

図8 スナップ画像・平均画像・パノラマ画像の例(2010年5月14日13時20分台).
Fig. 8 Overview of standard image types.

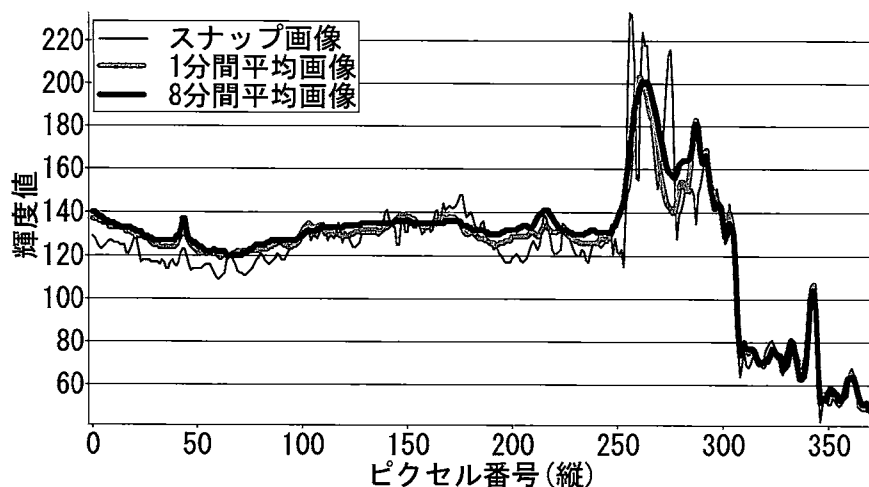


図9 スナップ画像と平均画像の輝度分布比較.

Fig. 9 Cross-shore distribution of pixel intensity on snapshot and time exposure image.

2) 座標変換画像の作成

一般に、カメラ画像では歪みが発生し、同じ大きさの物体であっても遠くにあるほど小さく写る。そこで、歪みを取り除いた写真地図を作るために座標変換を行う。座標変換は、写真上での画像平面座標系 $P'(x, y)$ とワールド座標系 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ とのキャリブレーションを取り、2つの座標系の間にカメラ座標系 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ を介在させ、変換マトリックスを求めることにより実行される。 X_w, Y_w, Z_w を X, Y, Z と添え字を省略して表記し、地表面を $Z=0$ と考え、キャリブレーション点（リファレンスポイント）をすべて $Z=0$ （地表面）上に取ることにする。これらの対応を取れる組が n 個存在するとすれば、以下の式が得られる（たとえば、藤田・中島，2000）。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -Y_1x_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -X_1y_1 & -Y_1y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 & X_n & Y_n & 1 & -X_nx_n & -Y_nx_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_ny_n & -Y_ny_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{14} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{24} \\ c_{31} \\ c_{32} \end{pmatrix}$$

式中の c_{ij} はカメラパラメータと呼ばれる。上式をマトリックス表記すると、 $\vec{x} = \vec{A}\vec{C}$ であり、カメラパラメータ \vec{C} は、次式により求めることが出来る。

$$\vec{C} = (\vec{A}^T \vec{C})^{-1} \vec{A}^T \vec{x}$$

8個のカメラパラメータを決定するには、最低4組のリファレンスポイントが必要である。これ以上の組数を利用する場合は、最小自乗近似を用いてカメラパラメータが決定される。次に、カメラパラメータで表された変換マトリックスに基づいて座標変換画像が作製される。変換後の1ピクセルあたりの現地距離は変換プログラムで指定可能である。この手法で作成した座標変換画像の一例が図10である。画像サイズは3299ピクセル×1778ピクセルである。この画像上では1ピクセル=0.1mに対応し、これにより汀線変化等の定量化が可能となる。

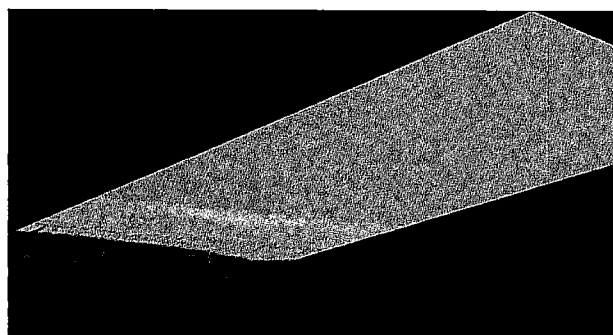


図10 座標変換画像（2010年5月14日13時20分台）.

Fig. 10 Example of rectified image (collected on 14/May/2010).

3) 輝度値による汀線および沿岸砂州の位置推定

カラー写真の画像上において、汀線位置は、海面と砂浜の色の違いにより、多くの場合比較的容易に判読することができる。しかし、解析で自動的に汀線位置を推定することは難しい。その原因としてカラー写真画像がRGB (Red, Green, Blue) の三原色で表されているため、汀線位置を判断するための基準を一意に決定することが容易でないことが挙げられる。そこで、海面と砂浜を分離しやすいよう以下の式を用いてグレースケール画像に変換して解析を行うことが試みられている(たとえば鈴木ら, 2002)。

$$X_y = 0.2989X_R + 0.5870X_G + 0.1140X_B$$

ここで、 X_y : 輝度値、 X_R , X_G , X_B : 元のカラー写真画像でのRGB値である。輝度値は0~255の範囲で表され、0が黒色、255が白色に対応(輝度値が大きいほど明るい)する。前述の図9に示すように、水深が浅くなり砕波によって気泡が発生すると輝度値が上昇する。海上部における輝度値の極大点は浅瀬部分、すなわち沿岸砂州の位置であると推定される。また、海面と陸地の境界付近で輝度値が一旦大きく上昇し、その後陸地側で急激に低下する地点は汀線位置と判断できる。

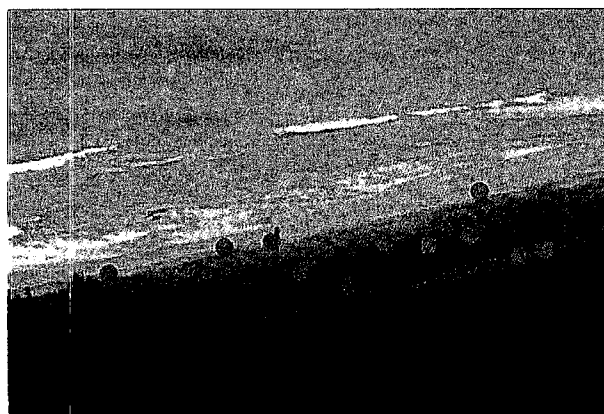
VI. 鉢ヶ崎海岸への適用

1) 座標変換精度の検討

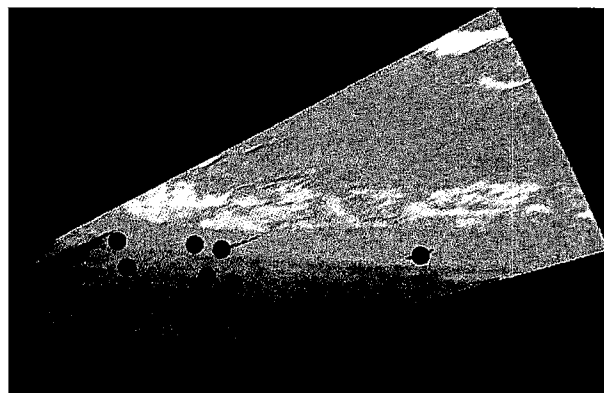
画像解析により、汀線位置などを算定する際には、

各種の要因による誤差が混入する。ここでは、その中でも影響が大きいと思われる、座標変換誤差に着目して、検討を行った。

ここでは、カメラ撮影時間帯の0分台、10分台、20分台における撮影範囲内にそれぞれ13, 18, 13点のリファレンスポイントを設けて、座標変換マトリクスを算定・適用し、座標変換精度を検討した。ワールド座標系におけるリファレンスポイントの座標値は、ホテル屋上より、トータルステーションにより測定した。トータルステーションとは、電子経緯儀・電子距離測定器およびコンピュータを搭載し、1回の視準で水平角・鉛直角および斜距離を同時に測定できる測量機器である。本研究では、Tajima社製GPT-7505を使用した。なお、後浜に位置するリファレンスポイントの高度は場所により異なるため、高度補正を行った後に精度検討を行った。以下は20分台の画像を例にとり述べる。まず座標変換前の画像上でリファレンスポイントの位置を確認・表記する(図11(a))。図中の丸印がリファレンスポイントの位置である。次に、これらのリファレンスポイントを用いて最小自乗法によりカメラパラメータを算出し、その結果得られた変換マトリクスをもとに座標変換画像(図11(b))を作製する。この例では、座標変換後の画像から1ピクセル=0.5mの縮尺で、リファレンスポイントの位置が読み取れる。そこで、各撮影時間帯において、トータルステーションによる測量値と座標変換画像からの読み取り値とを比較して、座標変換精度の検討を行った。図12は20分台での座



(a) 座標変換前画像.
(a) before rectification.



(b) 座標変換後画像.
(b) after rectification.

図11 座標変換前後の画像比較.

Fig. 11 Location of reference points.

標変換精度を検討した図であり、横軸・縦軸は、それぞれ、カメラ位置から西方向および南方向距離を表す。全体に一致は良好であるが、後浜の堤防に近い部分で若干違いが見られる。また、図13は沿岸方向と岸沖方向のそれぞれの測量値と座標変換値をプロットし、両者の回帰直線を付記したものである。すべての点がほぼ回帰直線上に存在しており、回帰直線式は岸沖方向、沿岸方向のいずれも $Y=0.999X$ となっている。

一般に、カメラからの距離が遠くなるほど、誤差は大きくなると考えられる。各撮影時間帯における観測カメラとリファレンスポイントまでの距離 L 、

誤差の平均値 (Ave)、標準偏差 (Std)、最大値 (Max) を求めたところ、20分台 ($L_{(20)}=284\text{m}\sim406\text{m}$) では、 $Ave_{(20)}=0.85\text{m}$, $Std_{(20)}=0.51$, $Max_{(20)}=1.79\text{m}$, 10分台 ($L_{(10)}=361\text{m}\sim611\text{m}$) では、 $Ave_{(10)}=2.58\text{m}$, $Std_{(10)}=1.87$, $Max_{(10)}=7.33\text{m}$, 0分台 ($L_{(0)}=597\text{m}\sim1017\text{m}$) では、 $Ave_{(0)}=12.09\text{m}$, $Std_{(0)}=19.30$, $Max_{(0)}=64.62\text{m}$ であった。0分台の誤差は、漁港よりの最も遠方に位置する点で顕著であり、 $L>1000\text{m}$ の領域で誤差が大きくなる結果となった。なお、座標変換マトリクス (カメラパラメータ) の算定に用いるリファレンスポイントの数を変化させて、同様の検討を行ったところ、誤差の大きさに顕著な変化は見られなかった。これより、

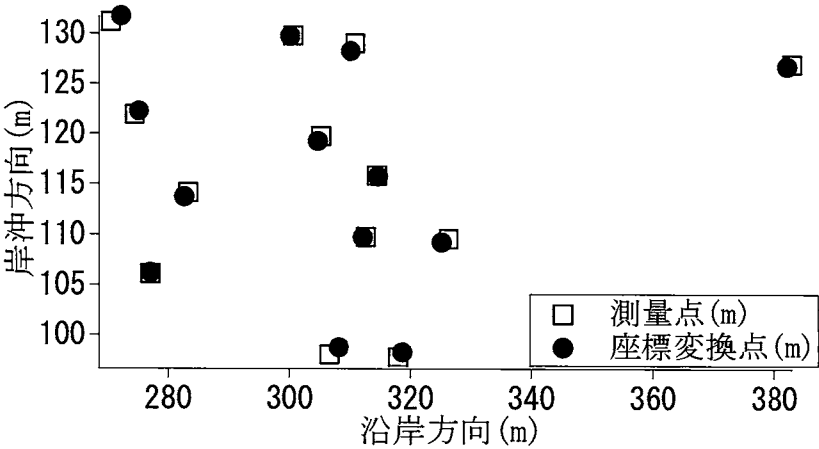


図12 測量点と座標変換点の比較.
Fig. 12 Comparison between the reference point locations obtained from image analysis and field survey.

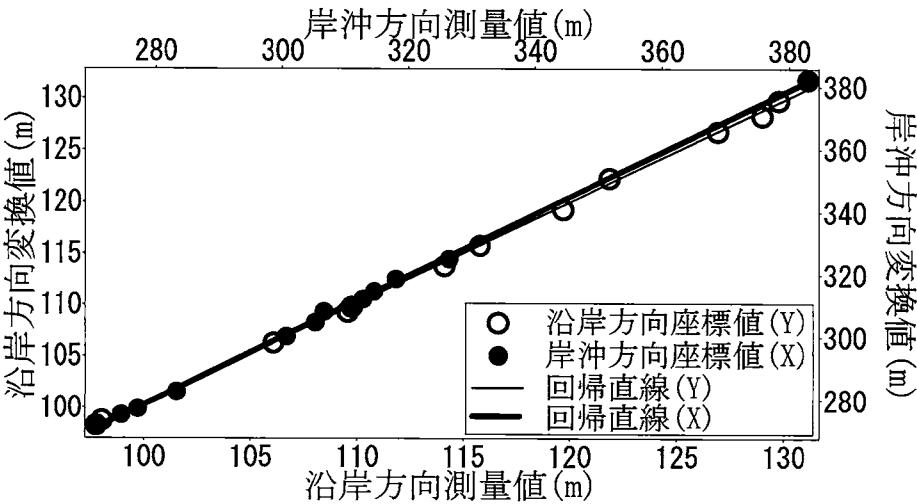


図13 測量点と座標変換点の座標比較および回帰直線.
Fig. 13 Comparison of cross-shore and alongshore coordinates of reference points obtained from image analysis and field survey.

最低4点のリファレンスポイントを確保できれば、カメラから数百mの範囲に渡って、1～2mの精度で座標変換を実行できることが確認できた。

2) 汀線変動解析への適用

2-1) 画像読み取りによる汀線変動の解析例

次に、観測画像を用いて、汀線位置および形状の変動を抽出・解析することを試みた。多くの砂浜海岸では、アーチ状の汀線形状がリズムに連なるカस्प地形が観測される。図14は観測画像からこのようなビーチカस्पの波長、振幅を読み取った一例である。図中の画像は2009年11月11日から4日間を対象に、11時10分台と20分台の座標変換画像を合成したものである。11月11日よりカस्पの形成が見られる。11日に比べて有義波高が小さく、逆に周期が長くなる12日にかけて、カस्पの成長が観察される。13日において、カस्पは最も発達し、その波長は156.7m、振幅7.1mであった。13日の有義波高および有義周期のデータは欠測している。有義波高および周期が小さくなる14日には、カस्पが縮小に向かっていく様子が観察される。また、海面の輝度値の高い（白い）部分に着目すると、三日月型沿岸砂州が

汀線側に近づいている位置にカस्पのホーン（突出部）が発達していることも確認できる。このように、本観測システムにより、汀線形状の時空間変化や、水面下の海底地形との対応を解析できることが確認された。

2-2) デジタイザーを利用した汀線変動の解析例

汀線形状の読み取りにあたっては、カラー画像の視認によるマニュアル的な判読法と、輝度値情報を用いた自動的な手法との2つが考えられる。ここでは、デジタイザーを援用して、視認により汀線形状の判読・解析を行った例を示す。

デジタイザーは画像における任意の点の座標を数値化するものである。これを利用して10分台日平均座標変換画像より汀線位置を読み取り、その変動を解析した例を図15に示す。解析期間（2010年5月3日～18日）の中で、カस्पの成長が顕著な5月8日から13日までのものを掲載した。なお縦方向のスケールを拡大して表示している。また、ここでは、輪島港における平均潮位および2010年5月の実測に基づく前浜勾配を用いて汀線位置の補正を行った。図より、汀線形状が全体にゆるやかな右下がりとなる。5月8日での汀線形状はほぼ直線的であるが、9日には少し

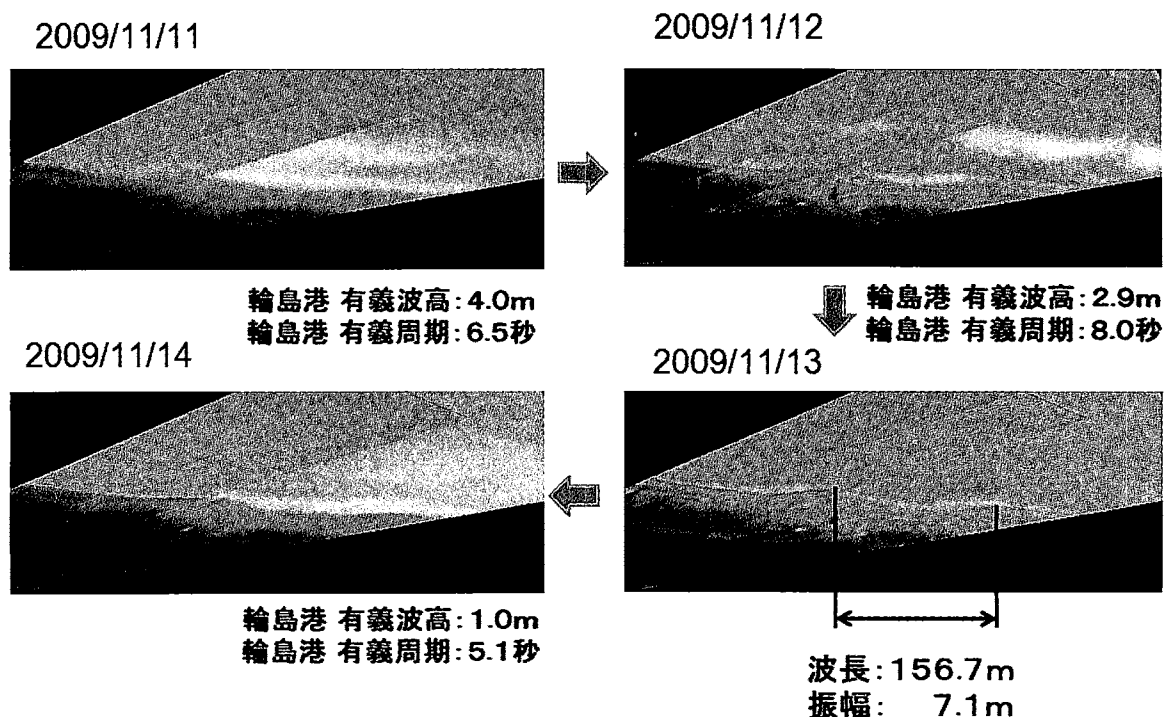


図14 座標変換画像によるカस्प地形の抽出例。

Fig. 14 Formation of cusped features of shoreline.

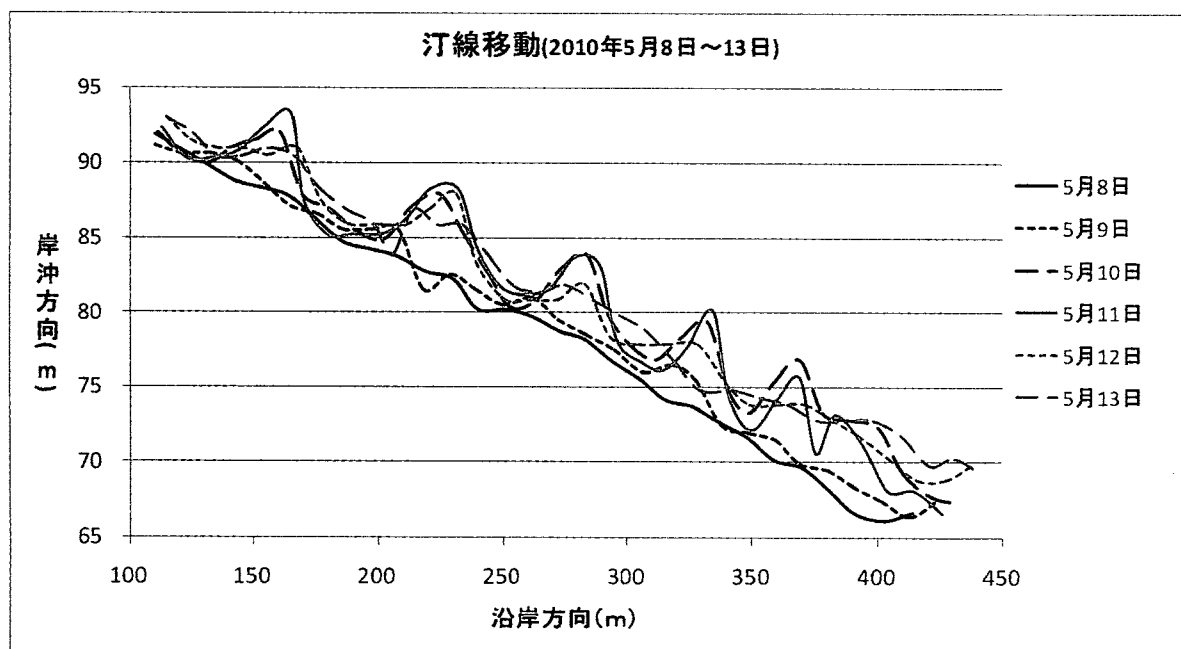


図15 座標変換画像による汀線変化の観察例.

Fig. 15 Video-based estimates of temporal variation of shoreline geometry.

波打つ様子が見られる。10日、11日にかけてカスプ地形が発達し、12日には縮小に転じている。11日の図中左3つのカスプの平均波長は56.9m, 平均振幅は6.9mであり、先の例と比べて、波長は短いが振幅は同程度である。有義波高 H と有義周期 T の変化を見ると、8日が $H_{(8)}=0.97\text{m}$, $T_{(8)}=7.2\text{s}$, 9日が $H_{(9)}=0.86\text{m}$, $T_{(9)}=7.3\text{s}$, 10日が $H_{(10)}=0.66\text{m}$, $T_{(10)}=5.1\text{s}$, 11日が $H_{(11)}=0.64\text{m}$, $T_{(11)}=5.6\text{s}$, 12日が $H_{(12)}=1.41\text{m}$, $T_{(12)}=5.9\text{s}$, 13日が $H_{(13)}=1.70\text{m}$, $T_{(13)}=6.9\text{s}$, であった。カスプが発達する期間是有義波周期の短い期間に対応しており、有義波高および周期が大きくなるとカスプは縮小に転じている。このように座標変換画像をデジタイザーで読み取るにより、汀線変動観測および解析が可能である。この読み取りを長期間に渡って実行することで、汀線の長期変動の解析も可能となる。

2-3) ピクセル画像を利用した汀線変動の解析例

続いて、ピクセル画像の輝度情報を利用した汀線変動解析例を以下に示す。ピクセル画像とは、任意の（ここでは沿岸方向の）ピクセル番号の同一画素列を時系列順に並べた画像である。2009年1月1日～2月28日までの日平均座標変換画像（時間ごとの平均画像をさらに一日に渡り平均化したものであり、図16に例示した）の中央位置（横方向320番目）に対応するピクセル画像を図17に示す。図17より、黒っぽ

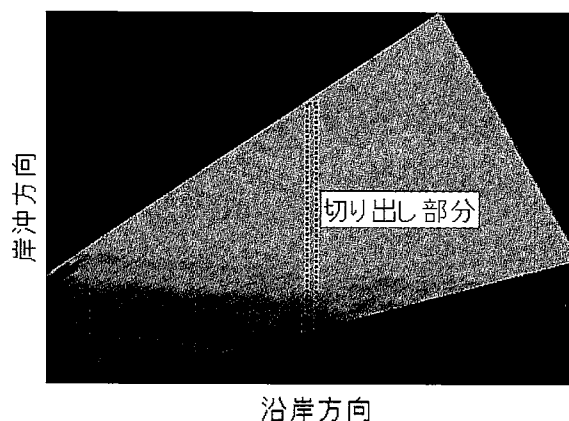


図16 日平均座標変換画像の例
(2009年1月18日の20分台).

Fig. 16 Example of rectified daily-averaged image (18/Jan./2009).

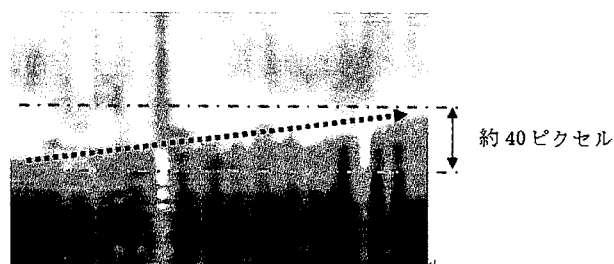


図17 汀線付近におけるピクセル画像の部分拡大図
(2009年1月1日～2月28日).

Fig. 17 Temporal variation of cross-shore pixel intensity near shoreline (from 01/Jan./2009 to 28/Feb./2009).

く見える輝度の低い部分が少しずつ沖向きに移動していることが確認できる。白い部分と黒い部分の境界が汀線位置を示しており、図中の点線の矢印で示したように、徐々に汀線が沖側に前進している。この間（59日間）の移動量は約20m（40ピクセル）であり、およそ0.34 m/dayで汀線が前進したことが確認できる。

このようにしてピクセル画像を用いることによりある測定点における汀線変動の観測および解析が可能である。ここで、輝度値にあるしきい値を設けることで、汀線位置を自動的に判別することが原理的には可能ではあるが、実際には天候による輝度の変動などのため、完全な自動化は難しい。

3) 沿岸砂州の変動解析への適用

国内外に位置する主要な砂浜海岸の多くは沿岸砂州を有しており、特に、日本海側の海岸において、多段の沿岸砂州が存在することが知られている。沿岸砂州は、水面下の浅瀬部分が汀線におよそ平行な形で発達したものであり、それ自体が自然の防波堤という役割を果たす。つまり、沿岸砂州の存在により、砕波が発生し、波のエネルギーが減衰して、沿岸波浪災害の抑制につながる。また、砂州は流れの弱い平穏域を作り、稚魚などの魚介類の生息域にもなる。こうした観点から、沿岸砂州の移動・変形の研究は、海岸環境保全の観点から重要である。

沿岸砂州は波浪条件に応じて沖向き、岸向きに移動する。その移動は砂州を構成している底質の移動による。波や流れによって浮遊した底質は戻り流れによって沖に運ばれる一方、底面近傍においては流速波形の上下・前後の非対称性や、底面勾配の影響も受ける。沿岸砂州が移動・変形する過程で、二列に分裂するBar Splittingと呼ばれる現象も報告されている。

ここでは、鉢ヶ崎海岸における沿岸砂州の存在および移動・変形に関して、2007年11月23日から2008年2月7日までの画像を解析した結果を示す。図18は2007年12月26日の7時40分台の平均画像であり、砕波帯の海底地形の特徴が明瞭に見てとれる。沖から来襲した波は、水深が浅くなると波高の高い波から砕波し始める。砕波に伴って気泡が発生し、これが光を反射してその点の輝度が高くなる。特に沿岸砂州の部分では水深の変化が大きいので砕波する波が増

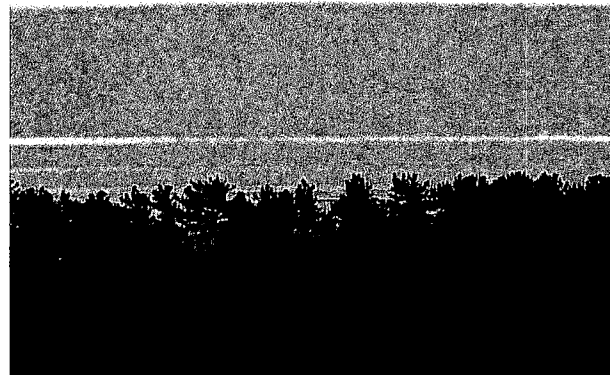


図18 沿岸砂州周辺の平均画像.

Fig. 18 Example of time exposure image near longshore bars.

えて輝度が大きくなる。砂州より岸側では水深が再び大きくなるため砕波が停止し、輝度が低下して、砂州の部分の画像上に帯状の白い部分が残る。この平均画像からは、二段の砂州に対応する部分が白く現れている。

砂州が存在し、砂州の頂部上で砕波が生じる場合には、頂部位置近傍で輝度値が高くなると考えられる。これより、輝度値が極大となる位置を砂州の位置と推定することができる。つまり、本観測システムによって砂州の位置や形状を抽出することが可能である。ただし、一般に、時間帯によって輝度値の絶対量は異なる。この違いが顕著に現れるのは画像上の空および海の範囲であり、これは日射の影響により、時間帯によって輝度値が大きく異なるためと考えられる。そのため、解析にあたっては時間帯によって輝度値を補正して解析を行ったほうが望ましい。以下では、画像の輝度値補正を行った後の結果を示す。

図19は、ホテル正面に位置する40分台画像の中央部（横方向ピクセル位置330番目）における、2007年11月23日～2008年2月7日までのピクセル画像である。波高が低い日は砕波が観察されないことから、砂州位置の特定は困難であるが、波高が高い日には、砕波が起こっている2本の筋が汀線より離れた位置に存在していることが、図中で明確に見て取れる。この白く見える部分が沿岸砂州の部分であり、その位置や形状が時間の経過とともに変化していることがこの図より読み取れる。この砂州は、12月中旬に2つに分裂し、その後、岸側の沿岸砂州が岸方向に移

動して汀線に付着する様子が観察される。

ここで示したように、本システムを活用することにより、Bar Splittingや砂州の岸沖移動など、海底地形の特徴的な変動を観測・抽出できることが確認された。

4) 入射波・海浜流特性解析への適用

最後に、本システムを用いて、波浪および海浜流の特性の解析を行うための試行検討を行った結果を示す。

まず、鉢ヶ崎海岸に入射してくる波浪特性について画像解析を試みた。図20は2009年1月18日の7時20分台のスナップ画像480枚のピクセル画像である(座標変換後の海上部分を抜粋している)。斜めに走る濁筋が波の進行に対応する。図20において濁筋が分かりやすい二か所に注目した場合、約8ピクセルの間隔で入射してくることが読み取れる。したがって、こ

の波の周期は約8秒程度となる。

図21は、図20中の縦方向ピクセル番号140番の位置における輝度値の時間変化を示したものである。図21の輝度値変動のピークが図20の濁筋に対応する。この変動をスペクトル解析することで入射波の周波数分布が推定できると考えられる。

次に、図22は図20の領域Aを拡大したものである。図22の濁筋の傾きから波の進行速度が推定できる。丸印の2点を対象として、横方向の距離は2～3ピクセル(2～3秒)、縦方向の距離は23ピクセル(11.5m)と読み取れる。したがって、波の進行速度は、およそ3.85 m/sec.～5.75m/sec.と求められる。周期と合わせると分散関係式から水深を推定できる。

図23は海浜流のうち、離岸流が観察された平均画像である。離岸流の発生により碎波位置を示す白いラインが沖側に湾曲する部分が見れる。これは離岸流の発生地点では強い沖向き(逆向き)の流れで波

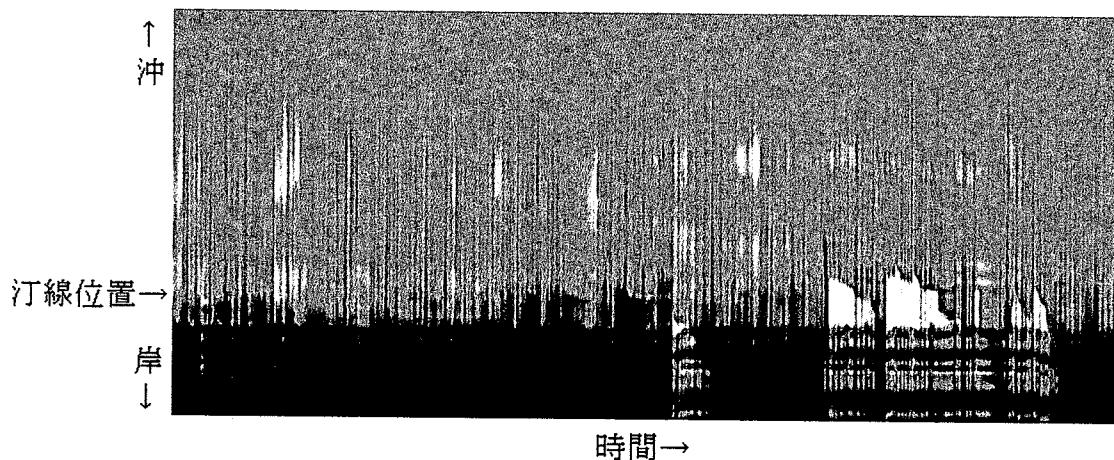


図19 沿岸砂州の位置変動を示すピクセル画像(2007年11月23日～2008年2月7日)。

Fig. 19 Time series of cross-shore pixel intensity images showing sandbar migration and splitting (from 23/Nov./2007 to 07/Feb./2008).

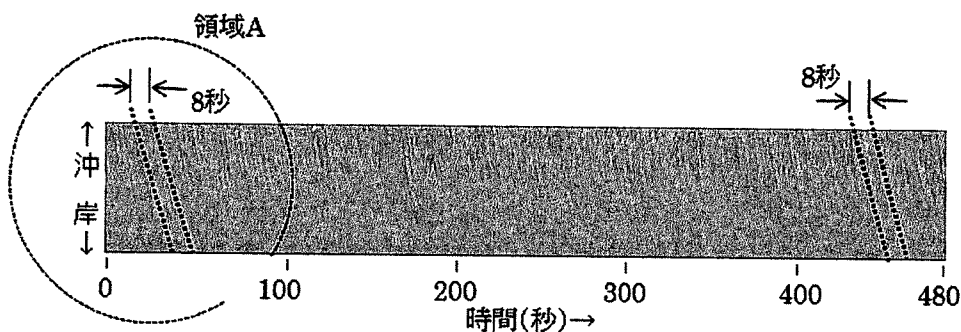


図20 海上部分のピクセル画像の例。

Fig. 20 Example of cross-shore pixel intensity time stack on the sea surface.

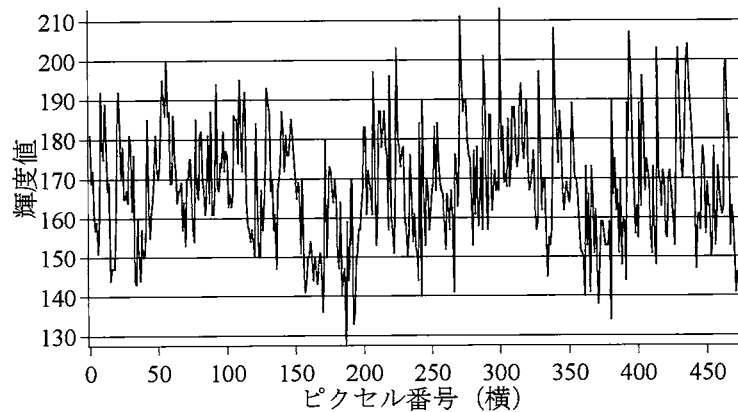


図21 ピクセル画像中の輝度値変化.

Fig. 21 Temporal variation of pixel intensity on a fixed point.

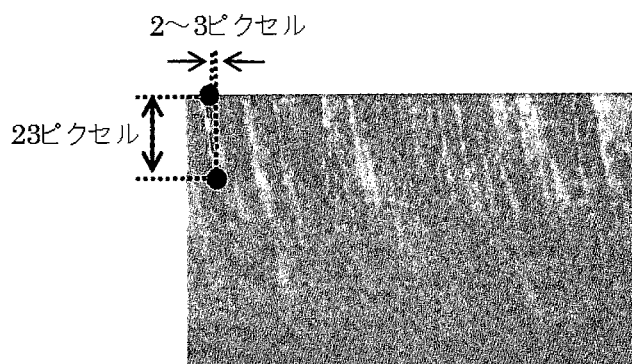


図22 海上部ピクセル画像領域Aの拡大図.

Fig. 22 Close up view of pixel intensity time stack.

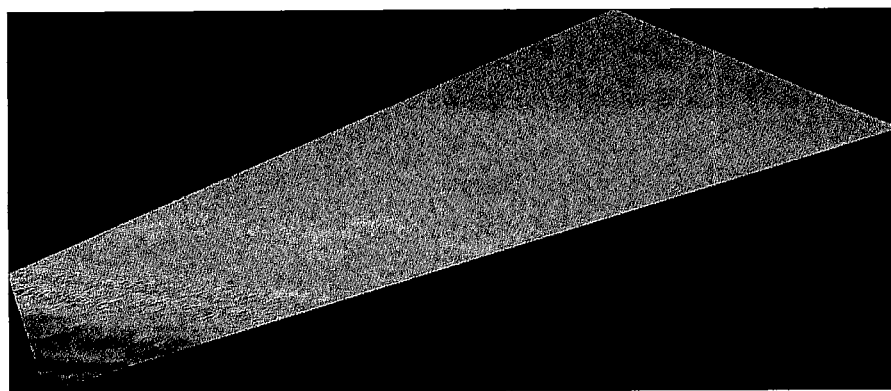


図23 離岸流発生時の画像（2007年11月26日）.

Fig. 23 Example of rectified time exposure image when rip currents were generated.

高が増大し、より沖側で砕波が発生するためである。

このように画像解析により入射波の周期や波速を求めること、および離岸流などの海浜流の存在を捉えることが可能であることが検証された。

VII. まとめ

1) 主要な成果

鈴木ら（2008）のネットワークカメラを用いた観測手法を、珠洲市鉢ヶ崎海岸に適用し、年間を通し

た観測データを取得した。これまでの観測および解析により、1台のカメラを用いた手法でも、ARGUSビデオモニタリングシステムと同様に短期的・中期的な汀線変動や沿岸砂州変動、および入射波・海浜流特性を観測・解析できることを検証した。

撮影時間0分台、10分台、20分台を対象に座標変換精度を検討した結果、測量値と座標変換画像値は全ての時間帯において概ね一致することが分かった。しかし、視準点と観測カメラとの距離が1kmを超えると精度が低下した。

2) 今後の課題

今後の課題としては、以下のような点をあげることができる。まず、リファレンスポイントを測量する際の正確な偏角調整が座標変換精度を向上させる可能性があるため、この点について検証が必要である。次に、観測カメラが強風により設定撮影角度からわずかにずれる場合があるため、これを防止する、あるいは、自動で補正するための対策が必要である。また、輝度値に基づいた汀線位置の推定を自動化・効率化するためには、さまざまなケースに対応できる判断基準の設定が必要である。

今後さらに観測を継続することにより、鉢ヶ崎海岸における波浪変形、海底地形データの蓄積が可能となり、海浜地形変動の特性解明が進むことが期待できる。さらに、今回構築した観測手法を千里浜、徳光、金沢港、手取川河口などの県内や北陸地方の他海岸へ適用することも期待される。

謝 辞: 本研究の一部は、平成20・21年度土木学会中部支部リサーチグループ（画像解析技術を用いた海浜地形の簡易モニタリングシステムの実用化に関する研究委員会）活動の一環として実施されたものである。土木学会中部支部からの補助に謝意を表する。本研究に際し、独立行政法人港湾空港技術研究所鈴木高二郎主任研究官に観測手法をご指導頂いた。珠洲ビーチホテルの松家清吾総支配人ならびに従業員の方々には珠洲での現地観測およびカメラのメンテナンス等に深甚なるご協力を頂いた。また、熊本大

学山田文彦教授には観測地鉢ヶ崎海岸において懇到なご指導を頂いた。金沢大学卒業生若林祐太君、犬伏章文君、金沢大学大学院修士生茨城 和君には多大な協力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- Lippman, T. C. and Holman, R. A., 1989: Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. *J. Geophysical Res.*, **94**, 995-1011.
- 浅田 昭, 2005: 水中のビジュアライゼーションを革新する音響ソナー. 生研公開講演, **57**, 455-465.
- 紺野義男, 1984: 北陸の丘陵と平野. アーバンクボタ, **23**, 36-39.
- 木村 晃・大野賢一, 2006: 鳥取海岸における海底地形の短期変化について. 海岸工学論文集, **53**, 571-575.
- 木村 晃・大野賢一, 2007: 鳥取海岸における沿岸砂州の短期変化について. 海岸工学論文集, **54**, 666-670.
- 木村 晃・大野賢一, 2008: 鳥取海岸沿岸のouter barの短期変化特性について. 海岸工学論文集, **55**, 716-720.
- 鈴木高二郎・高橋重雄・山縣延文・堀田 治・栗山善昭・Aarninkhol, S.・Ruessink, G.・Elshoff, I., 2002: ARGUSビデオ解析による宮崎住吉海岸の長期地形観測. 海岸工学論文集, **49**, 571-575.
- 鈴木高二郎・有路隆一・諸星一信・柳島慎一・高橋重雄・松坂省一・鈴木伸昭, 2008: WEBカメラを用いた海岸の連続観測手法の開発について. 海岸工学論文集, **55**, 1446-1450.
- 武若 聡・中村 崇, 1999: 係留ビデオシステムによる碎波帯の水理現象観測の試み. 海岸工学論文集, **46**, 151-155.
- 武若 聡・中村 崇・三崎尚一郎, 2000: 係留ビデオシステムを用いた碎波帯現象の解析. 海岸工学論文集, **47**, 126-130.
- 藤田一郎・中島文晴, 2000: 実河川流計測におけるLSPIVの汎用化と水制間流れへの適用. 水工学論文集, **44**, 443-448.
- 山口柏樹, 1980: 土質力学. 技報堂, 東京, 389p.